

Joonas Vatjus

**Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten
ominaisuudet**

Fysiikan pro gradu -tutkielma

28. tammikuuta 2019

Oulun yliopisto

Luonnontieteellinen tiedekunta

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	1
2	TEORIA	3
2.1	Aurinko	3
2.1.1	Auringon rakenne	3
2.1.2	Auringonpilkut	5
2.2	Aurinkotuuli	7
2.2.1	Perustietoa aurinkotuulesta	7
2.2.2	Nopeus	7
2.2.3	Magneettivuon tiheys ja IMF	9
2.2.4	CIR ("corotating interaction region")	10
2.2.5	Koronan massapurkaus (CME)	11
2.3	Maan magnetosfääri	12
2.3.1	Magnetosfäärin ulkoreuna	12
2.3.2	Magnetosfäärin yöpuoleinen pyrstö ja napaonkalot	13
2.3.3	Geostationaarisen radan sisäpuolinen magnetosfääri	13
2.4	Geomagneettiset indeksit	15
2.4.1	AE-indeksi	15
2.4.2	SYM-H-indeksi	16
2.4.3	Kp-indeksi	16
2.5	Akasofun epsilon-parametri	17
2.5.1	Aurinkotuulen magneettikentän kellokulma	17
2.6	Geo-HSS tapahtuma	18
2.6.1	Geovaikuttava aurinkotuuli	18
2.6.2	HSS tapahtuma	18
3	TUTKIMUS	19
4	TUTKIMUSTULOKSET	20
4.1	Geo-HSS tapahtumien yleisyys	20
4.1.1	Geo-HSS tapahtumat ilman koronan massapurkausta	20
4.1.2	Geo-HSS tapahtumat koronan massapurkauksissa	22
4.2	Ominaisuuksien keskimääräiset arvot tutkittavalla aikavälillä	24
4.2.1	Nopeus	24
4.2.2	Magneettivuon tiheys	25
4.2.3	Magneettivuon tiheyden z-komponentti	26
4.2.4	Elektronitiheys	26
4.2.5	Akasofun epsilon-parametri	27
4.2.6	AE-indeksi	28
4.2.7	SYM-H-indeksi	29
4.2.8	Kp-indeksi	29
4.3	Ominaisuudet kahdessa eri geo-HSS tapahtumassa	31
4.3.1	28.5.1998 alkanut geo-HSS tapahtuma	31

4.3.2	8.10.2012 alkanut geo-HSS tapahtuma	33
5	YHTEENVETO	35
	LÄHTEET	37
	LIITTEET	39
A	NOAA:n antama geomagneettisen häiriötilan luokittelu.....	39

1 Johdanto

Auringon aktiiviset ilmiöt vaikuttavat Maassa havaittaviin geomagneettisiin ilmiöihin. Tätä yhteyttä on alettu ymmärtää vasta aurinkotuulen löytymisen jälkeen.

Koskinen [2001] huomioi aurinkotuulen löytöhistoriaa käsitellessään brittiläisen matemaatiikon ja geofyysikon Sydney Chapmanin ehdotukset vuodelta 1929:

”Auringon roihujen yhteydessä Aurinko emittoisi varatuista hiukkasista koostuvia plasmapilviä ja iskeytyessään Maan magneettikenttään nämä pilvet aiheuttaisivat siinä havaittuja häiriöitä.”

Tämä ehdotus sisälsi kuitenkin vielä epämääräisen käsitteen ”plasmapilvi”. *Koskinen* [2001] jatkaa:

”Ei kuitenkaan ollut mitenkään selvää, kuinka tällaiset pilvet pääsisivät irti Auringon gravitaatiokentästä ja kuinka ne etenisivät tyhjäksi oletetussa planeettainvälisessä avaruudessa.”

Niinpä amerikkalainen astrofyysikko Eugene N. Parker esitti 1958 ajatuksen koronan laajenemisesta tai romahtamisesta staattisen tasapainon sijaan. Samoihin aikoihin 1960 luvun vaihteessa venäläiset ja myöhemmin myös amerikkalaiset satelliittimittaukset osoittivat aurinkotuulen olemassaolon.

Aurinkotuuli on pro gradu -tutkielmani yksi keskeinen elementti. Tutkielmassani perehdyn erityisesti aurinkotuulen nopeisiin virtauksiin ($v \geq 500 \text{ km/s}$) ja vielä erityisemmin siihen aurinkotuulen osajoukkoon, joka aiheuttaa geomagneettisia häiriöitä Maan magneettikentässä.

Yhdysvaltalainen sää ja valtameritutkimusorganisaatio NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) luokittelee geomagneettisten häiriöiden voimakkuuden niiden HF-radioon (korkeataajuusradio), navigaatio-signaaleihin, satelliitteihin, avaruusalusten toimintoihin sekä suuriin sähköjärjestelmiin aiheuttamien häiriöiden perusteella (Liite A).

Tämä osoittaa aurinkotuulen synnyttämän geovaikuttavuuden ja nykyteknologialle huomion arvoisen riskimahdollisuuden.

Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten vaikutukset pohjautuvat Auringon ja Maan välisiin avaruudellisiin ilmiöihin. Kyseisten ilmiöiden keskeisimpiä elementtejä ovat Auringosta ulkoavaruuteen satojen kilometrien sekuntivauhdilla sinkoutuva aurinkotuuli sekä Maan magneettikenttä, joiden vuorovaikutuksesta syntyy laaja ja hyvin monimuotoinen alue, magnetosfääri.

Maata kohti saapuvan aurinkotuulen sisältämä energia poistuu ensisijaisesti magnetosfäärin ulkokehän alueille. Toisinaan kuitenkin, aurinkotuulen ominaisuuksista (erityisesti nopeudesta ja magneettikentästä) riippuen, energiaa purkautuu myös magnetosfäärin sisempiin osiin maapallon tuntumaan. Tällaisen energianpurkauksen aiheuttava aurinkotuuli voi olla geovaikuttava.

Tutkielman tarkoitus on tutkia geovaikuttavan aurinkotuulen ominaisuuksia aurinkotuulella sijaitsevien satelliittimittausten avulla.

2 Teoria

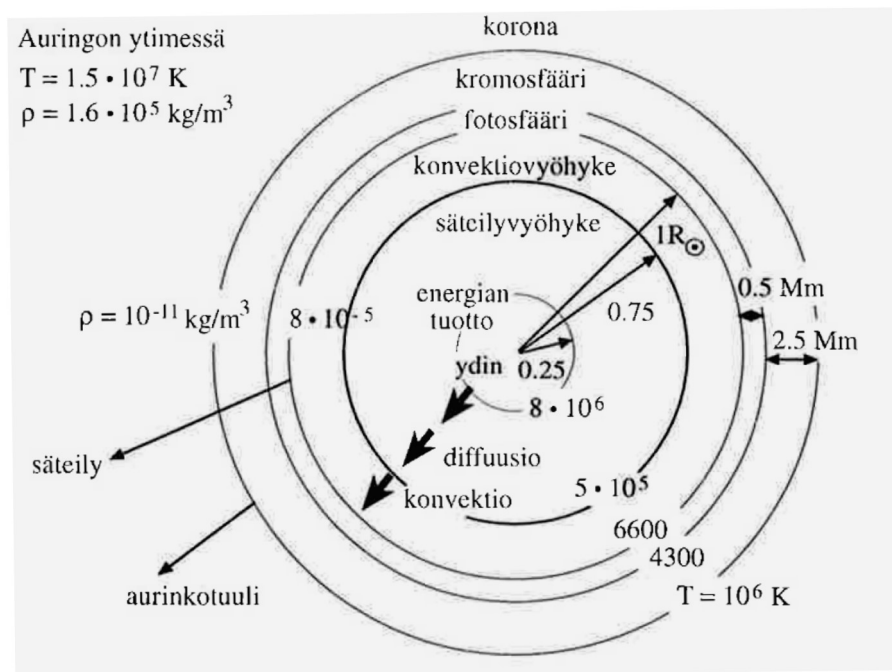
2.1 Aurinko

2.1.1 Auringon rakenne

Aurinkokuntamme ikä on nykyarvion mukaan 4,6 miljardia vuotta. Tässä ajassa Aurinko on käyttänyt kaikkiaan noin 5 % vetyvarannoistaan [Karttunen, 2016].

Auringon säde $R_{\odot} = 696\,000\text{ km}$, massa $M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30}\text{ kg}$ ja keskietaisyys Maasta $1\text{ AU} = 150 \times 10^6\text{ km}$ ($\approx 215 R_{\odot}$).

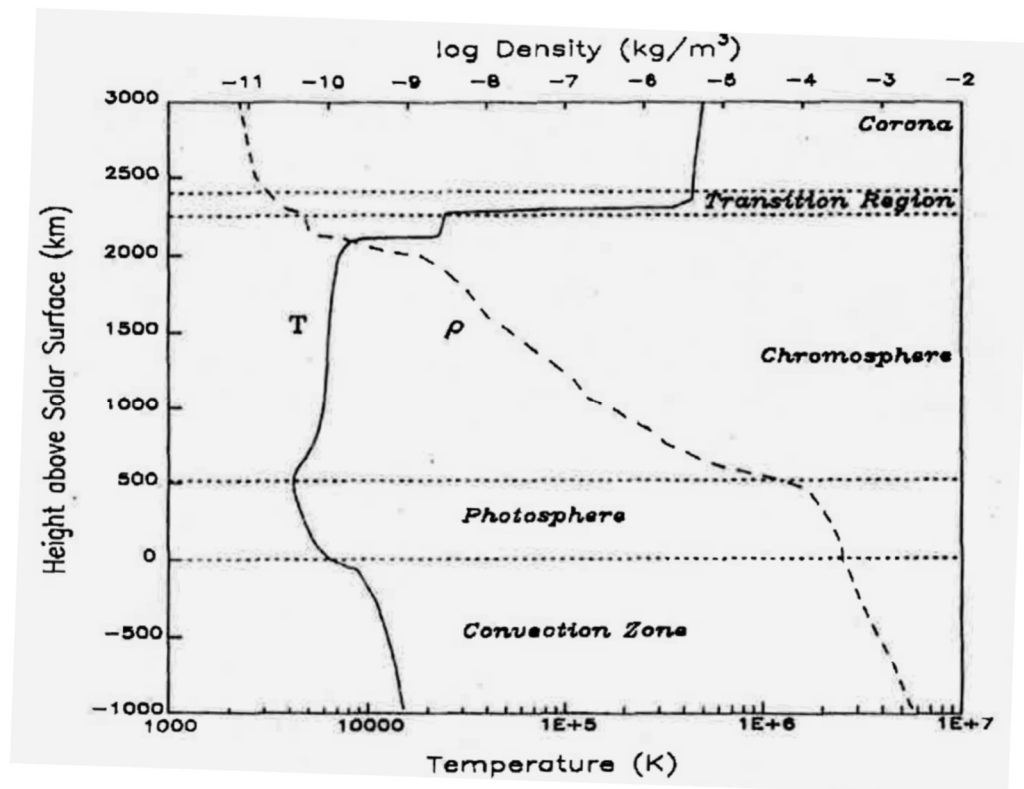
Auringon ytimessä (ks. kuva 1) tapahtuu jatkuvaa fuusioreaktiota. Koskisen [2001] mukaan yhden sekunnin aikana noin 600 miljoona tonnia vetyä fuusioituu 596 miljoonaksi tonniksi heliumia. Loput 4 miljoonaa tonnia muuttuu korkeaenergiaisiksi gamma- ja röntgenfotoneiksi.



Kuva 1. Auringon rakenne ja energian siirtymisen vaiheet [Koskinen, 2001].

Fuusioreaktiosta vapautunutta energiaa kantavat fotonit absorboituvat ja edelleen emittoituvat *säteilyvyöhykkeen* (ks. kuva 1) materian kanssa. Jatkuva absorptio-emissio prosessi hidastaa energian etenemistä niin, että yhden fotonin voidaan ajatella matkaavan säteilyvyöhykkeessä kaikkiaan 10 miljoonaa vuotta. Ko. matkan aikana fotonien energia pienenee ja aallonpituus lähestyy vähitellen näkyvän valon aallonpituusaluetta [Aikio, 2010].

Auringon pinnan ja säteilyvyöhykkeen välinen *konvektiovyöhyke* (ks. kuva 2; *convection zone*) muodostuu turbulenteista plasman konvektiosoluista [Koskinen, 2001]. Solujen sisällä kuuma plasma nousee ylöspäin, jäähtyy ja laskeutuu takaisin alaspäin mahdollistaen samalla energian siirtymisen Auringon pintaa kohti [Aikio, 2010].



Kuva 2. Auringon uloimpien kerrosten lämpötila ja logaritminen tiheys [Aikio, 2010].

Fotosfääri (ks. kuva 2; *photosphere*) on ohut, noin 500 km paksuinen Auringon pintakerros. Se absorboi sisältä tulevan säteilyn ja emittoi sen sitten ulkoavaruuteen. Säteily leviää ulkoavaruuden kaikkiin suuntiin. Maan etäisyydellä (1 AU), Auringon fotosfääristä saapunut säteilyvuo on noin 1,37 kilowattia neliometriä kohden. Fotosfäärin lämpötilan alhaisuudesta

johtuen se on Auringon ainoa kerros, jossa materia ei ole täysin ionisoitunutta [Koskinen, 2001].

Fotosfäärin yläpuolella *kromosfäärissä* (ks. kuva 2; *chromosphere*) Auringon hiukkastiheys pienenee niin paljon, että fotosfäärin emittoima säteily läpäisee sen. Näin ollen kromosfääriä on vaikea havaita ja se onnistuukin vain auringonpimennysten aikana. Kromosfäärin voidaan täten ajatella olevan auringon ilmakehää ja sen alimmainen kerros [Koskinen, 2001].

Noin 2000 km Auringon pinnan yläpuolella nk. siirtymäalueessa (ks. kuva 2; *transition region*, ”siirtymä-alue”), lämpötila kasvaa äkillisesti. Siirtymäalueen ulkopuolista ja samalla Auringon ulommaista kerrosta kutsutaan *koronaksi* (ks. kuva 2; *corona*). Koronassa atomit ova suuresta lämpötilasta johtuen menettäneet suuren osan elektroniverhostaan. Tästä johtuen korona sisältää hyvin korkeasti ionisoituneita alkuaineita [Aikio, 2010].

2.1.2 Auringonpilkut

Auringonpilkut (ks. kuva 3) muodostuvat Auringon magneettisen aktiivisuuden seurauksena. Auringon konvektiovyöhykkeen konvektion synnyttämä magneettikenttä jäähdyttää Auringon fotosfääriä keskimäärin 1500 K kohdassa, jossa magneettivuon tiheys on suurimmillaan. Jäähtyneet kohdat erottuvat Auringossa ympäristöään tummempina auringonpilkkuina.

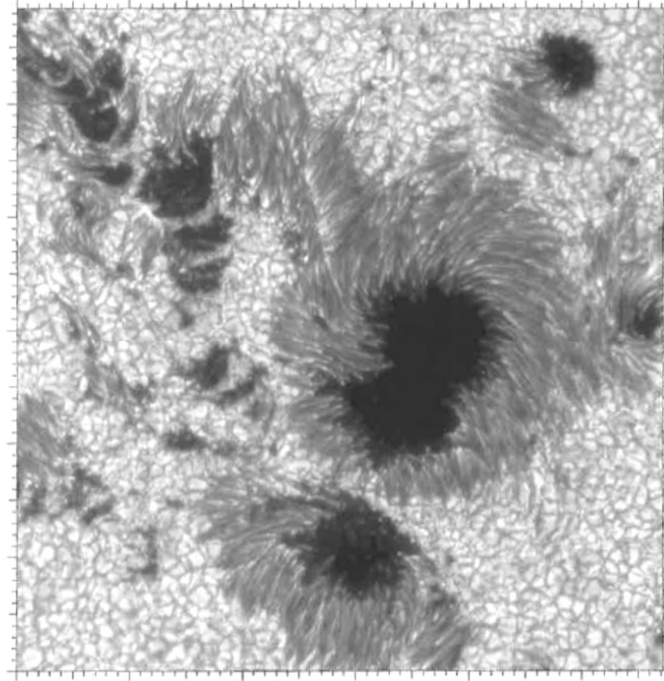
Pilkut esiintyvät usein pareittain tai suuremmissa ryhmissä. Auringonpilkkuparin toisen osapuolen magneettinen napa on positiivinen, toisen negatiivinen [Koskinen, 2001]. Auringonpilkkujen määrää kuvataan Zürichin auringonpilkkuluvulla

$$Z = C(s + 10g), \quad (2.1)$$

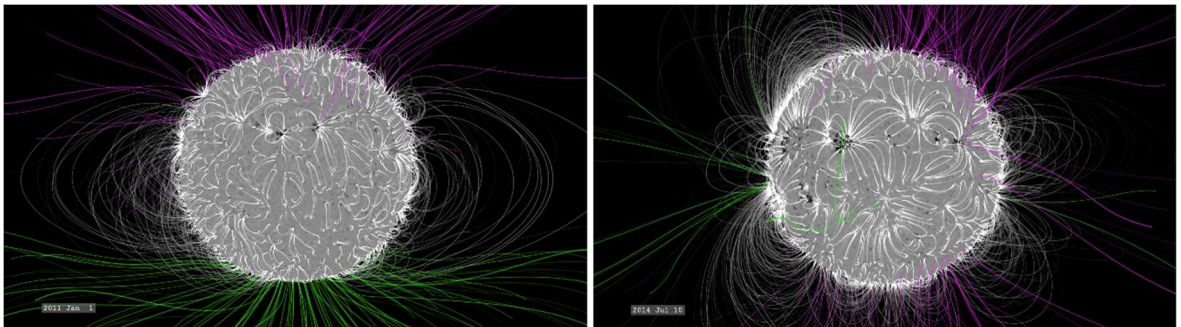
missä C on havaitsijasta ja havainto-olosuhteista riippuva vakio, s on havaintopaikalle kul-
lakin ajanhetkellä näkyvien pilkkujen lukumäärä ja g pilkkuryhmien määrä.

Zürichin auringonpilkkuluvun vaihtelua on seurattu lähes 250 vuoden ajan. Tuloksien mukaan auringonpilkkuluku vaihtelee noin 11 vuoden jaksoissa (aurinkosykli) [Karttunen,

2016]. Kuva 4 näyttää Auringon magneettikentän rakenteen kahdessa eri aurinkosyklin vaiheessa.



Kuva 3. Auringonpilkku. Kuva on otettu 15.6.2002 aurinkoteleskoopilla. Pilkun keskus on tummasävyinen umbra, jota ympäröi vaaleampi reunus, penumbra. Kuvan leveys ja korkeus vastaa noin 60 000 kilometriä Auringon pinnalla [Karttunen, 2016].



Kuva 4. Auringon magneettikentän rakenne tammikuussa 2011 (vasen kuva; kolme vuotta aurinkominimistä) ja heinäkuussa 2014 (oikea kuva; aurinkomaksimi) [<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/min-max.png>], (haettu 11.6.2018)].

2.2 Aurinkotuuli

2.2.1 Perustietoa aurinkotuulesta

Plasmasta koostuva aurinkotuuli on lähtöisin Auringon koronasta. Koronan kuumuudesta johtuen Auringon gravitaatio ei kykene pidättelemään ulkoavaruuteen sinkoutuvia hiukkasia vaikutuspiirissään, jonka vuoksi ko. hiukkaset muodostavat satojen kilometrien sekuntivauhdilla Auringosta ulkoavaruuteen etenevän aurinkotuulen. Suurin osa aurinkotuulen hiukkasista on protoneja ja elektroneja, joita 1 AU :n etäisyydellä on noin 5 - 10 kappaletta kuutiosenttimetrissä. Aurinkotuulella on mukana myös mm. heliumatomien ytimiä [Karttunen, 2016].

Auringon aktiivisuus ja koronan rakenne määrittävät aurinkotuulen fysikaaliset ominaisuudet [Laitinen, 2007]. Aurinkotuulen fysikaalisia ominaisuuksia kuvataan tyypillisimmin parametreilla nopeus v , hiukkastiheys n , lämpötila T (elektronit ja protonit erikseen) sekä magneettivuon tiheys B .

	minimi	keskimäärin	maksimi
v	200 km/s	400 km/s	900 km/s
n	$4 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$	$6.5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$	10^8 m^{-3}
T_e	$5 \times 10^3 \text{ K}$	$2 \times 10^5 \text{ K}$	10^6 K
T_p	$3 \times 10^3 \text{ K}$	$5 \times 10^4 \text{ K}$	10^6 K
B	0.2 nT	6 nT	80 nT

Taulukko 1. Tyypillisiä aurinkotuulen arvoja 1 AU :ssa [Koskinen, 2001].

Aurinkotuulen parametreista nopeus ja magneettivuon tiheys ovat keskeisimmässä asemassa tutkielmassani, joten käsittelen niitä (ks. 2.2.2 ja 2.2.3) muita perusteellisemmin.

2.2.2 Nopeus

Tarkastellaan seuraavia yhtälöitä.

$$4\pi r^2 n v = C \quad (2.2)$$

Yhtälö (2.2) on nk. jatkuvuusyhtälö. Sen mukaan aurinkotuulen plasman hiukkasvuo r -säteisen Aurinkoa ympäröivän pallopinnan läpi on vakio C .

$$nmv \frac{dv}{dr} = -\frac{dp}{dr} - \frac{GnmM_{\odot}}{r^2} \quad (2.3)$$

Yhtälö (2.3) on m massaisen aurinkotuulen hiukkasen liikeyhtälö, missä $\partial/\partial t = 0$, mutta nopeudella on säteittäinen gradientti $\partial v/\partial r$, joka riippuu painegradientista $\partial p/\partial r$ ja Auringon gravitaatiosta $GnmM_{\odot}/r^2$.

$$p = nk_B T \quad (2.4)$$

Yhtälö (2.4) on isoterminen ideaalisen kaasun tilayhtälö missä k_B on Boltzmannin vakio. Yhtälöistä (2.2), (2.3) ja (2.4) saadaan ratkaisujoukko

$$\left(v - \frac{v_c^2}{v}\right) \frac{dv}{dr} = \frac{2v_c^2}{r} - \frac{GM_{\odot}}{r^2}, \quad (2.5)$$

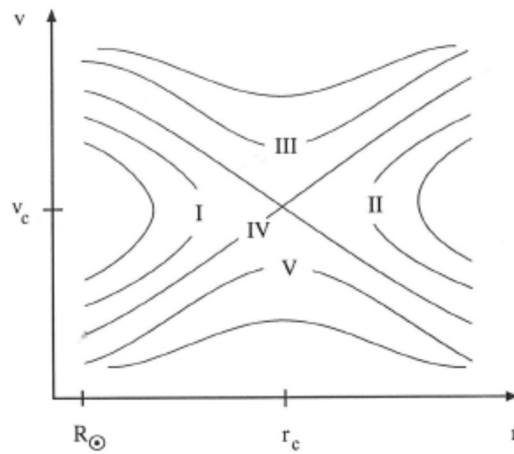
missä

$$v_c = \sqrt{k_B T/m} \quad (2.6)$$

on isoterminen äänennopeus. Yhtälöllä (2.5) on kriittinen piste, missä plasman nopeus v on sama kuin isoterminen äänennopeus v_c . Sijoittamalla $v = v_c$ ja $r = r_c$ yhtälöön (2.5), saadaan kriittisen pisteen etäisyydeksi Auringon keskuksesta

$$r_c = \frac{GM_{\odot}}{2v_c^2}. \quad (2.7)$$

Yhtälön (2.5) integroiminen tuottaa kuvion 7 mukaiset käyrät.



Kuva 5. Yhtälön (2.5) integraatiokäyrät [Koskinen, 2001].

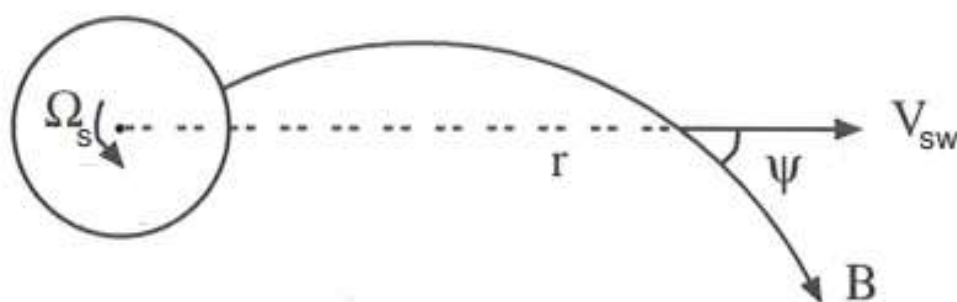
Alueiden I ja II käyrät ovat epäfysikaalisia, sillä ne sisältävät kaksi nopeusarvoa millä tahansa etäisyydellä r . Alueen III käyrät ovat myös epäfysikaalisia, sillä niiden mukaan koronan laajeneminen lähellä Aurinkoa olisi yliäänistä. Alueen V käyrät ovat fysikaalisesti mielekkäitä, mutta ne eivät vastaa havaintoja 1 AU:ssa. Näiden sijaan ratkaisu IV kulkee kriittisen pisteen r_c läpi.

Tämä on astrofyysikko Eugene N. Parkerin löytämä ratkaisu aurinkotuulen nopeuden käyttäytymiselle. Ratkaisu ei anna nopeuden käyttäytymisestä tarkkaa kuvaa, vaan olennaisimpana asiana ratkaisu kertoo sen, että tietyssä pisteessä r_c aliaäninen aurinkotuulen virtaus muuttuu yliääniseksi [Koskinen, 2001; Aikio, 2011].

Aurinkotuulen nopeuden arvot 1 AU:ssa vaihtelevat välillä 200 – 900 km/s (ks. taulukko 1).

2.2.3 Magneettivuon tiheys ja IMF

Aurinkotuulen magneettikenttää kutsutaan yleisesti planeettainväliseksi magneettikentäksi (interplanetary magnetic field, IMF). Aurinkotuulen plasman suuren johtavuuden seurauksena IMF:n kenttäviivat kulkeutuvat aurinkotuulen mukana. Auringon pyörimisestä johtuen kenttäviivat kiertyvät Arkhimedeen spiraalin muotoon (ks. kuva 6). Spiraalikulma ψ on 1 AU:ssa noin 44° [Koskinen, 2001].



Kuva 6. IMF:n kenttäviivojen kiertyminen [Aikio, 2011].

IMF:n magneettivuon tiheydelle B on löydetty yhtälö

$$\mathbf{B} = B_S \left(\frac{R_\odot}{r} \right)^2 \mathbf{e}_r - B_S \left(\frac{R_\odot^2}{r} \right) \frac{\Omega_s \sin \theta}{v_{sw}} \mathbf{e}_\phi. \quad (2.7)$$

Yhtälössä (2.7) v_{sw} on aurinkotuulen nopeus, jonka suunta on Auringosta radiaalisesti ulospäin. Ω_S on Auringon kulmanopeus ja B_S radiaalinen magneettivuontiheys Auringon pinnalla. r on etäisyys Auringon keskuksesta ja θ on kenttäviivojen napakulma [Aikio, 2011].

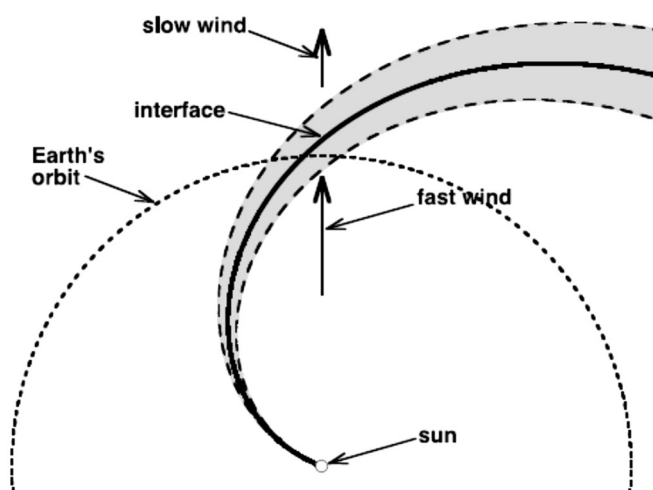
Spiraalikulman ψ tangentille, eli toisin sanoen IMF:n atsimutaalisen komponentin B_ϕ ja radiaalisen komponentin B_r väliselle suhteelle pätee relaatio

$$\tan \psi = |B_\phi|/B_r = \frac{r\Omega_S}{v_{sw}}. \quad (2.8)$$

Magneettivuon tiheyden arvot 1 AU:ssa vaihtelevat välillä 0,2 – 80 nT (ks. taulukko 1).

2.2.4 CIR ("corotating interaction region")

Eri alueet Auringossa tuottavat eri nopeuksista aurinkotuulta. Auringon pyöriessä nopeaa aurinkotuulta tuottavat alueet liikkuvat pyörimisliikkeen mukana. Yksi pyörähdys kestää n. 27 päivää. Koska säteittäisesti Auringosta ulospäin virtaava nopea aurinkotuuli (ks. kuva 7; *fast wind*) saavuttaa edellään virtaavan hitaan aurinkotuulen (ks. kuva 7; *slow wind*), Auringon ulkopuolella vallitsee jatkuva nopean ja hitaan aurinkotuulen välinen spiraalimainen törmäysalue CIR ("corotating interaction region"). CIR näkyy kuvassa 7 harmaaksi varjostettuna alueena [Borovsky and Denton, 2010].

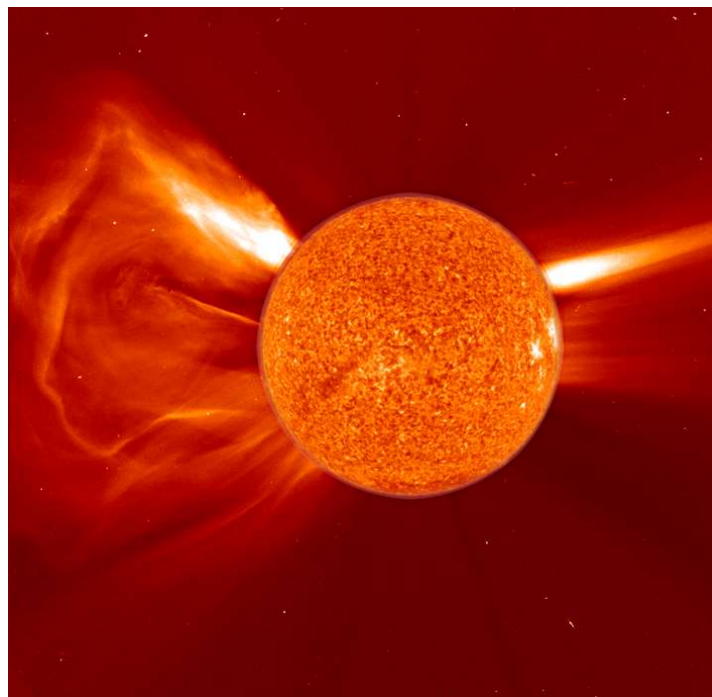


Kuva 7. Ideaalinen CIR kuvitettuna Maan ekvaattoritasossa [Borovsky and Denton, 2010].

Nopean aurinkotuulen kohdatessa CIR:n, se hidastuu ja puristuu. Tämän seurauksena aurinkotuulen plasman paine, lämpötila sekä magneettikenttä kasvavat. CIR:n sisäisen rajapinnan (ks. kuva 7; *interface*) ulkopuolella hidastunut ja puristunut aurinkotuuli hetkellisesti kiihtyy ja poistuessaan CIR:n vaikutusalueesta puristuu edelleen hitaaksi aurinkotuuleksi ympäristön vaikutuksesta [Smith and Wolfe, 1976].

2.2.5 Koronan massapurkaus (CME)

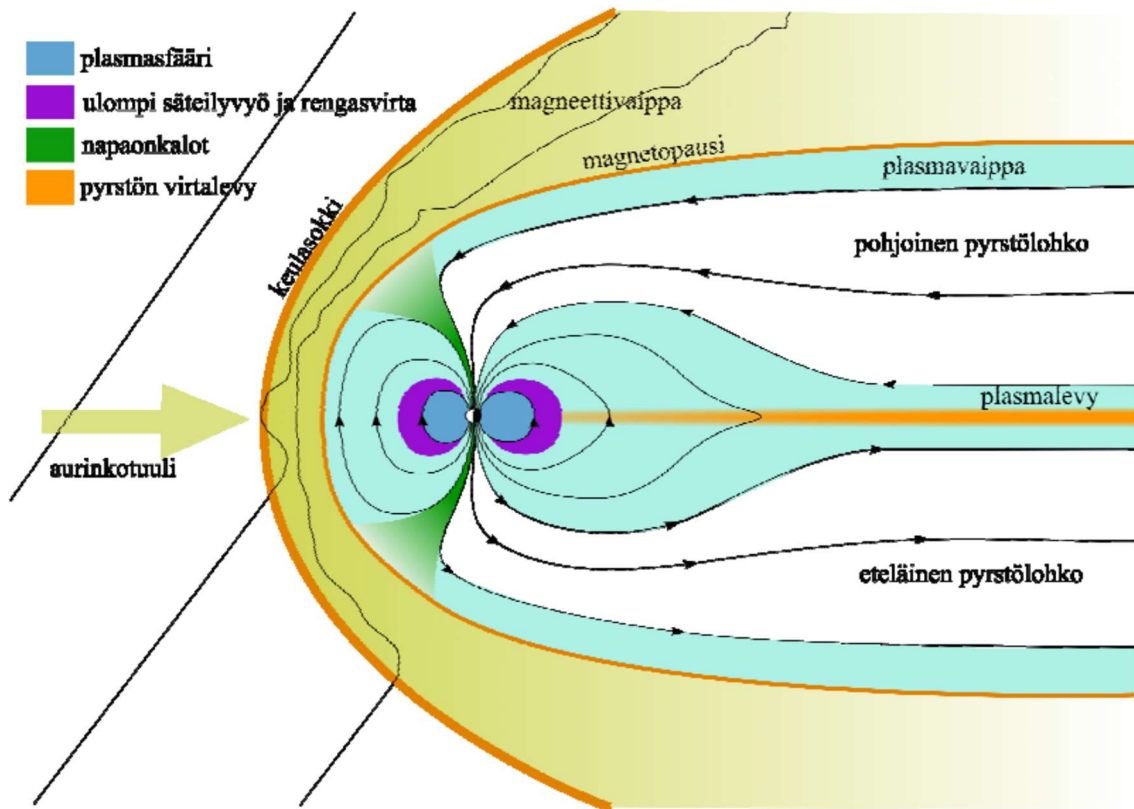
Koronan massapurkauksessa (CME; ”coronal mass ejection”) Auringosta purkautuu kerralla suuri määrä plasmaa. Purkautunut plasma on peräisin Auringon kromos- ja fotosfääristä. Koronan massapurkaus voidaan havaita koronan äkillisenä laajenemisena (ks. kuva 8) [Aikio, 2010].



Kuva 8. Kirkas ja laaja koronan massapurkaus kuvattuna SOHO:n LASCO C2 koronagrafilla 24.1.2007 [<https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/SolarCorona/combination001.html>], (haettu 28.1.2019)].

2.3 Maan magnetosfääri

Aurinkotuulen ja maapallon nestemäisen ulkoytimen (n. 4000 km:n syvyydessä maanpinnalta) konvektion synnyttämän Maan magneettikentän vuorovaikutus muodostaa maapallon ympärille *Maan magnetosfäärin* (ks. kuva 9). Maan magnetosfääri on Maan magneettikentän hallitsema avaruuden osa, johon aurinkotuuli ei pääse suoraan tunkeutumaan.



Kuva. 9 Maan magnetosfääri [Laitinen, 2007].

2.3.1 Magnetosfäärin ulkoreuna

Kuvassa 9 näkyy magnetosfäärin ulkopuolella *magneettivaippa* ja *keulasokki*. *Magnetopaussilla* tarkoitetaan magnetosfäärin ulkoreunaa. Keulasokki on magnetosfäärin eteen muodostunut iskurintama, jossa aurinkotuulen virtaus muuttuu yliaänisestä aliaäniseksi. Kun aurinkotuulen virtauksen kineettinen energia pienenee, plasman terminen energia kasvaa.

Magneettivaipassa aurinkotuulen magneettikenttä taipuu magnetosfäärin ympärille. Magnetosfäärin rajapinnan eli magnetopauassin etäisyys maapallon keskipisteestä Auringon suuntaan on noin $10 R_E$ (maapallon säde $R_E = 6400 \text{ km}$) keulasokki on siitä edelleen noin $3 R_E$:n päässä [Baumjohann and Treumann, 1996; Laitinen, 2007].

2.3.2 Magnetosfäärin yöpuoleinen pyrstö ja napaonkalot

Magnetosfäärin pyrstö sisältää magneettisia vuoputkia, jotka ovat kytkeytyneet Maan napa-alueiden ionosfääriin (ks. kuva 9; *pohjoinen – ja eteläinen pyrstölohko*). Koska ko. vuoputkissa magneettikenttä osoittaa päinvastaisiin suuntiin, niiden välissä täytyy kulkea kenttäviivojen poikki suuntautuva sähkövirta. Tämä *plasmalevyssä* (ks. kuva 9) kulkeva nk. poikki-pyrstövirta (engl. ”cross-tail current”, J_{CT}) näkyy kuvassa 9 oranssilla värillä kuvitettuna pyrstön virtalevynä (virran kulkusuunta on kuvassa katsojaa kohti). Poikki-pyrstövirta sulkeutuu molempien vuoputkien ympäri kiertävillä magnetopauassin virroilla. Magnetopauassin virrat, J_{MP} , syntyvät aurinkotuulen ja magnetosfäärin vuorovaikutuksesta [Koskinen, 2001].

Magnetosfäärin pyrstön reunaosien *plasmavaippa* (engl. ”mantle”, ks. kuva 9) sisältää pääasiassa aurinkotuulesta peräisin olevaa plasmaa, joka on vuotanut magnetosfäärin sisälle magneettivaipasta. Kuvassa 9 vihreällä kuvitettut *napaonkalot* (engl. ”polar cusp”) ovat erityisiä magnetopauassin vuotokohtia, jotka kuvautuvat ionosfäärin päiväpuolelle korkeille leveysasteille [Laitinen, 2007].

2.3.3 Geostationaarisen radan sisäpuolinen magnetosfääri

Geostationaarisen radan (etäisyys maapallon pinnalta noin $36\,000 \text{ km}$) sisäpuolella magneettikentän kenttäviivat kulkeutuvat eteläiseltä pallonpuoliskolta pohjoiselle pallonpuoliskolle muodostaen lähes dipolimaisen magneettikentän. Tämä lähes dipolimainen magneettikenttä pitää sisällään kolme energeettiseltä suuruusluokaltaan toisistaan poikkeavaa hiukkaspopulaatiota: *plasmasfääri*, *Van Allenin säteilyvyöhykkeet* sekä *rengasvirta* [Koskinen, 2001].

Plasmasfääri (ks. kuva 9; sininen alue) on magnetosfäärin sisimmäinen alue. Plasmasfäärin sisältämä plasma on pienienergiaista (yhden hiukkasen energia 1 eV :n suuruusluokkaa). Hiukkastiheys on plasmasfäärissä suuri, noin 1000 hiukkasta kuutiosenttimetrissä. Plasma

on peräisin Maan ionosfääristä. Plasmasfäärin ulkoreunan etäisyys vaihtelee noin 10 000 – 25 000 kilometrin välillä maanpinnasta.

Maan magneettikentän vangitsevat korkeaenergiset hiukkaset muodostavat geostationaarisen radan sisäpuolelle kaksi Van Allenin säteilyvyöhykettä. Vyöhykkeistä ulommainen (10 000 – 65 000 km maanpinnasta, ks. kuva 9; violetti alue) sisältää pääosin korkeaenergisiiä elektroneja (elektronien energia $keV - MeV$ suuruusluokkaa). Sisempi vyöhyke (1000 – 6000 km maanpinnalta) sisältää pääosin korkeaenergisiiä protoneja (protonien energia 0,1 – 40 MeV suuruusluokkaa) [Koskinen, 2001].

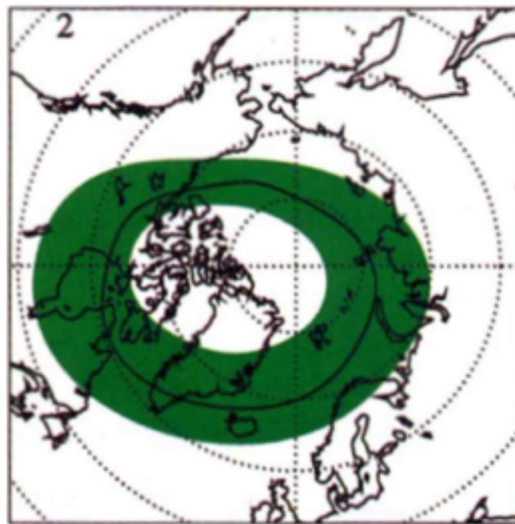
Ulomman Van Allenin vyöhykkeen elektronit kulkeutuvat itään ja aiheuttavat näin sähkövirran länteen päin. Sisemmän vyöhykkeen protonit kulkeutuvat länteen aiheuttaen näin sähkövirran myös länteen päin. Myös muiden hiukkasten (pääosin ionit H^+ ja O^+) aiheuttamien sähkövirtojen nettovirta osoittaa länteen. Edellä mainittujen kokonaisvaikutuksena Maata kiertää jatkuvasti noin $2 - 7 R_E:n$ etäisyydellä maanpinnasta länteen päin nk. rengasvirta (ks. kuva 9; violetti alue) [Koskinen, 2001; Zhang et al., 2007].

2.4 Geomagneettiset indeksit

Aurinkotuulen geovaikuttavuutta mitataan geomagneettisten indeksien avulla. Indeksien arvot saadaan maanpinnalla tehtävistä magnetometrimittauksista.

2.4.1 AE-indeksi

AE-indeksi (Auroral Electrojet Activity Index) on alkujaan yhdysvaltalaisen geofyysikko Thomas Neil Davisin (1932 - 2016) esittämä indeksi revontulialueiden suihkuvirtauksen aktiivisuuden määrittämiseksi. Revontulialueiden suihkuvirtaukset (engl. "auroral electrojets") ovat Maan napa-alueiden ionosfäärissä kulkevien ionien (enimmäkseen ionit O^{2+} ja NO^+) aiheuttamia sähkövirtoja. Revontulialueilla tarkoitetaan maapallon magneettisia napoja ympäröiviä ovaalin muotoisia alueita (ks. kuva 10) [Aikio, 2011].

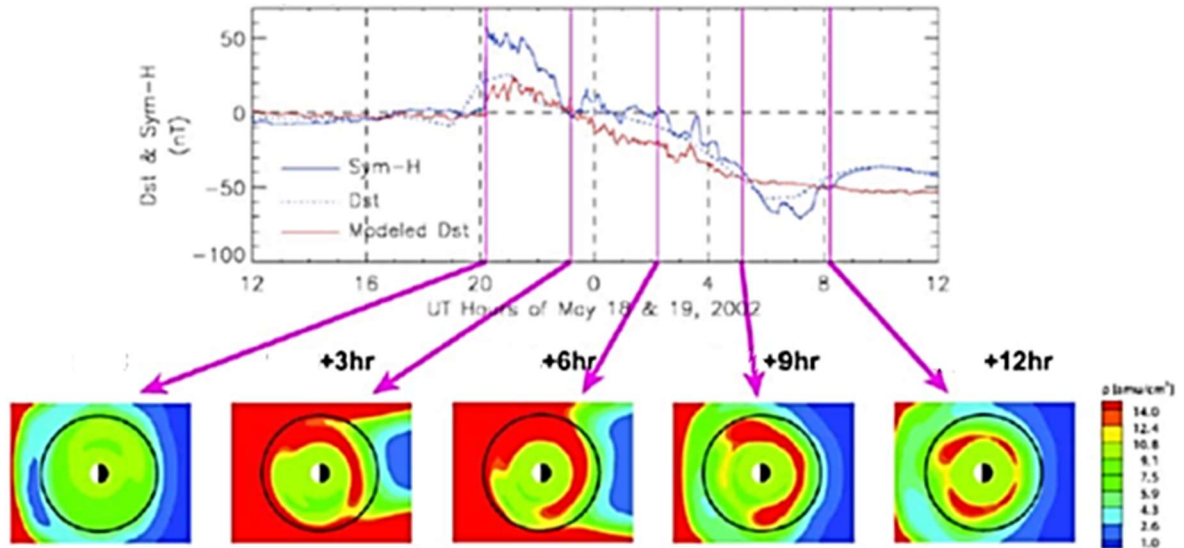


Kuva 10. Maapallon magneettista etelänapaa ympäröivä revontuliovaali [Aikio, 2011].

Revontulialueiden suihkuvirtauksen aktiivisuus riippuu magnetosfäärin ja aurinkotuulen välisestä kyteytymisestä. Aurinkotuulen energian voimakas purkautuminen magnetosfääriin saattaa aiheuttaa plasmalevyn katkeamisen. Katkenneen plasmalevyn Maan puoleinen osa lähestyy kiihtyvällä liikkeellä Maata kohti. Magnetosfääri ohjaa Maata kohti lähestyvät hiukkaset revontulialueelle aiheuttaen näin kytkeytymistilan voimistumisen [Kaila, 1998]. Tämä ilmenee revontulialueiden suihkuvirtauksen voimistumisena ja AE-indeksin arvon äkillisenä kasvuna.

2.4.2 SYM-H-indeksi

SYM-H-indeksi kuvaa magnetosfäärin rengasvirran voimakkuutta. SYM-H-indeksi saa minimiarvon, kun rengasvirta on voimakkaimmillaan (ks. kuva 11).



Kuva 11. Rengasvirtaa kuljettavan plasman tiheyden ρ (yksikkö amu/cm^3 ; $\text{amu} \sim$ ”atomic mass unit”, alapaneeli) ja SYM-H-indeksin (yläpaneelin kuvaajassa sininen käyrä) kehitys 12 tunnin aikana geomagneettisen häiriön alkuhetkestä lähtien. Musta ympyrä kuvastaa geostationaarista rataa, mustavalkoinen keskus maapalloa [Zhang *et al.*, 2006].

2.4.3 Kp-indeksi

Saksalainen geofyysikko Julius Bartels kehitti *Kp-indeksin* 1949. Kp-indeksi otettiin kansainväliseen käyttöön *geomagneettista häiriötilaa* kuvaavana indeksinä IAGA:n (International Association for Geomagnetism and Aeronomy) toimesta vuonna 1951. Kp-indeksi kertoo kolmentoista magneettisen observatorion mittaaman magneettikentän horisontaalisen komponentin muutoksen keskiarvon maanpinnalla. Tämä on muunnettu matemaattisin menetelmin kvasilogaritmiseksi luvuksi, joka saa arvoja välillä 0 – 9 [<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>], (haettu 9.7.2018)].

2.5 Akasofun epsilon-parametri

Akasofun epsilon-parametri kuvaa aurinkotuulen energian syöttöä Maan magnetosfäarin sisään [Koskinen, 2001]. Akasofun epsilon-parametri ε määritellään aurinkotuulen nopeuden v , magneettikentän B_{tot} sekä kellokulman θ avulla

$$\varepsilon = \frac{4\pi}{\mu_0} v B_{tot}^2 L_0^2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (2.7)$$

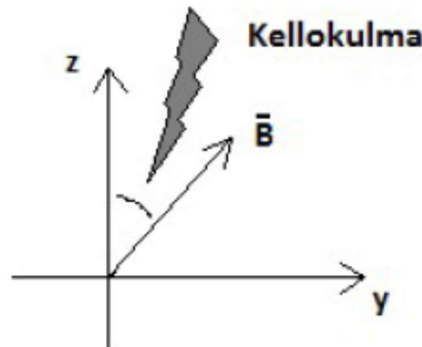
Yhtälössä esiintyvät vakiot ovat tyhjiön permittiivisyys μ_0 ($\approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) sekä pituusparametri $L_0 \cong 7R_E$ (rekonnektioviivan pituus magnetopausi-rajapinnalla).

2.5.1 Aurinkotuulen magneettikentän kellokulma

Aurinkotuulen magneettikentän kellokulma θ (engl. "IMF clock angle") määritellään aurinkotuulen magneettikentän komponenttien B_y ja B_z avulla GSM-koordinaatistossa seuraavasti:

$$\begin{cases} \theta = \arctan|B_y/B_z|, & \text{jos } B_z > 0 \\ \theta = \pi - \arctan|B_y/B_z|, & \text{jos } B_z < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

GSM-koordinaatistossa x osoittaa kohti Aurinkoa, z on Maan magneettisen dipoliakselin (positiivinen pohjoiseen) projektio x -akselia vastaan kohtisuoralle tasolle, ja y -akseli täydentää oikeakätisen koordinaatiston.



Kuva 12. GSM-koordinaatiston z -akselin ja IMF-vektorin (yz -tasossa) \vec{B} väliin jäävää kulmaa kutsutaan kellokulmaksi.

2.6 Geo-HSS tapahtuma

Aurinkotuulen virtaus aiheuttaa *geo-HSS tapahtuman*, jos se on *geovaikuttava* (ks. 2.6.1) ja on aiheuttanut *HSS tapahtuman* (ks. 2.6.2).

2.6.1 Geovaikuttava aurinkotuuli

Tässä tutkielmassa geovaikuttavan aurinkotuulen määrittelemiseksi tukeudutaan yhdysvaltalaisen sää- ja valtameritutkimusorganisaation NOAA:n (National Oceanic and Atmospheric Administration, perustettu 1970) antamaan geomagneettisten häiriöiden luokitteluun (ks. Liite A).

NOAA:n luokittelun mukaan Maahan vaikuttaa geomagneettinen häiriötila, jos Kp-indeksi on viisi tai suurempi. Tutkielmassani aurinkotuuli määritellään siis geovaikuttavaksi aurinkotuuleksi, jos sen seurauksena on geomagneettinen häiriötila (ts. $Kp \geq 5$).

2.6.2 HSS tapahtuma

Aurinkotuulesta on etsitty nopeita virtauksia, ”high-speed stream (HSS) events” automaattisen etsintäohjelman avulla [Grandin et al., 2015], jonka pääkriteerit ovat:

- 1) magneettikentän aikaderivaatta $dB/dt \geq 0,1 \text{ nT/min}$
ja
- 2) nopeus saavuttaa nopeuden 500 m/s viimeistään kahden vuorokauden kuluttua ehdon 1) toteutumisen jälkeen.

Uusi HSS tapahtuma voi löytyä aikaisintaan ehdon 2) toteutumishetken jälkeisen neljän vuorokauden kuluttua [Grandin et al., 2015].

3 Tutkimus

Tutkimuksen tarkoitus on tutkia geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten ominaisuuksia. Aurinkotuulen virtaus määritellään tässä tutkimuksessa geovaikuttavan aurinkotuulen nopaksi virtaukseksi, jos se on aiheuttanut geo-HSS tapahtuman.

Tutkimuksessa käytetty data-aineisto on peräisin ACE-avaruusluotaimen keräämästä datasta. ACE (Advanced Composition Explorer) avaruusluotain kiertää maapalloa Lagrangen L1-pisteessä, noin 1,5 miljoonaa kilometriä Maasta kohti Aurinkoa.

ACE-avaruusluotaimen keräämä data on haettu OMNI-datapalvelimelta. Palvelimelta haetun datan käsittely on tehty Maxime Grandinin tekemällä ohjelmalla, joka käyttää Matlab-kieltä. Ohjelmaan tehtiin pieniä muutoksia tätä työtä varten.

Tutkimuksessa käytetty data-aineisto on rajattu aikavälille 1995 – 2017.

4 Tutkimustulokset

Tutkimustuloksissa käsitellään ensin geo-HSS tapahtumien yleisyyttä. Tämän jälkeen tutkitaan geo-HSS tapahtumien ominaisuuksien tilastollisia arvoja (mediaani, ylä- ja alakvartiili). Tutkimustuloksien viimeisessä osiossa analysoidaan kahden toisistaan poikkeavan geo-HSS tapahtuman ominaisuuksia ja vertaillaan niitä geo-HSS tapahtumien keskimääräisiin ominaisuuksiin.

Geo-HSS tapahtumien yleisyyttä käsittelevässä tutkimuksen osiossa käsitellään myös lyhyesti *koronan massapurkauksia* (ks. 4.1.2). Tutkimuksen muissa osioissa tarkastellaan vain niitä geo-HSS tapahtumia, joihin ei liity koronan massapurkausta.

4.1 Geo-HSS tapahtumien yleisyys

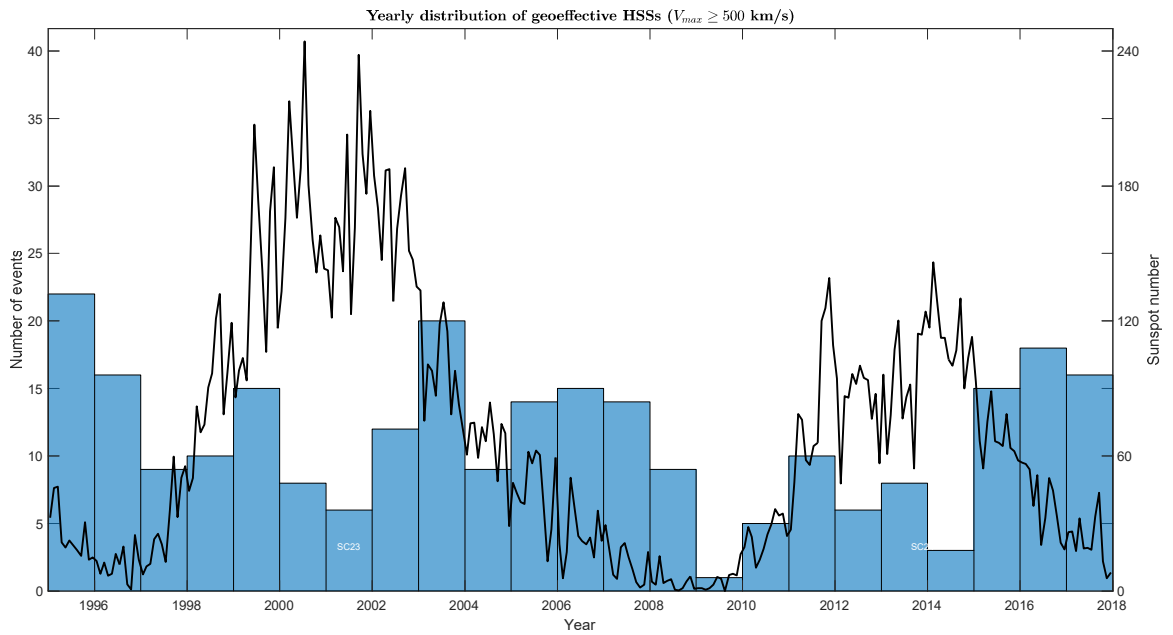
Geo-HSS tapahtumien vuosittaista jakautumista tarkastellaan kappaleissa 4.1.1 ja 4.1.2 histogrammikuvien (kuvat 13, 14 ja 15) avulla.

Histogrammikuvien oikeanpuoleisella pystyakselilla on auringonpilkkuluku (”sunspot number”). Aurinkopilkkuluku näkyy kuvissa mustalla käyrällä kuvitettuna. Kuvien vasemmanpuoleisella pystyakselilla on tapahtumien vuosittainen lukumäärä (”number of events”). Tapahtumien vuosittainen lukumäärä näkyy kuvissa pystypalkeilla kuvitettuna. Vaaka-akselilla on tutkittava aikaväli 1995 – 2017.

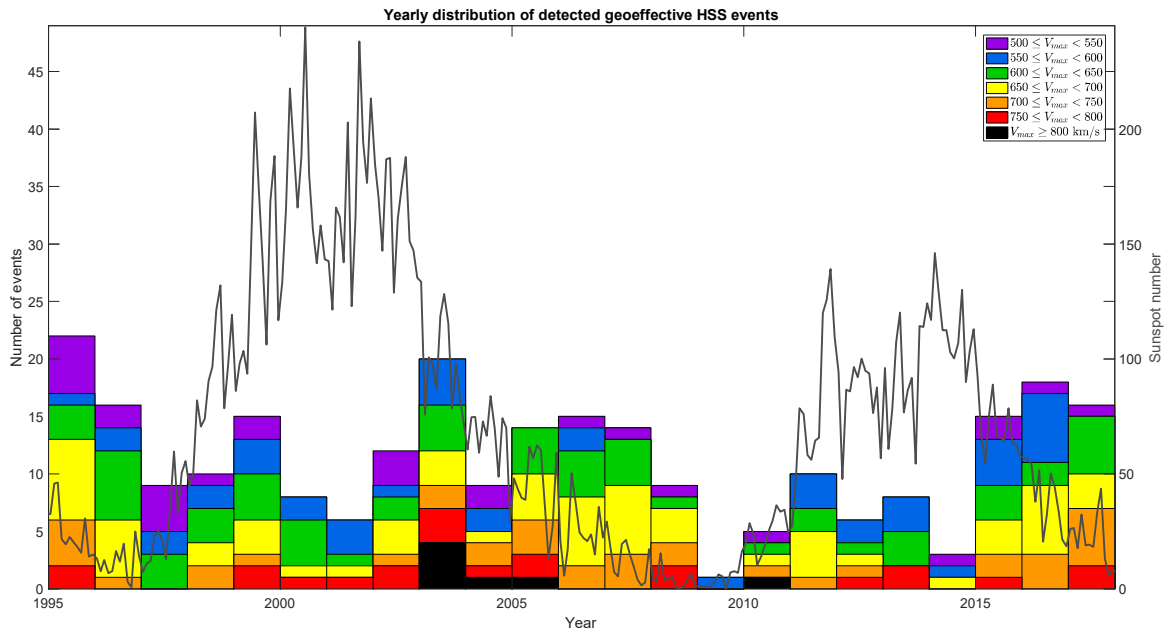
Aikavälillä 1995 – 2017 geo-HSS tapahtumia on ollut yhteensä 356. Näistä 95 on aiheutunut Auringossa tapahtuneen koronan massapurkauksen synnyttämän aurinkotuulen vaikutuksesta. Geo-HSS tapahtumia ilman koronan massapurkausta on ollut tutkitulla aikavälillä yhteensä 261.

4.1.1 Geo-HSS tapahtumat ilman koronan massapurkausta

Kuvien 13 ja 14 mukaan tapahtumien vuosittainen lukumäärä vaihtelee välillä 1 – 22. Lukumäärällinen keskiarvo on noin 14 tapahtumaa vuodessa.



Kuva 13. Geo-HSS tapahtumien (ilman koronan massapurkausta) vuosittainen jakautuminen.



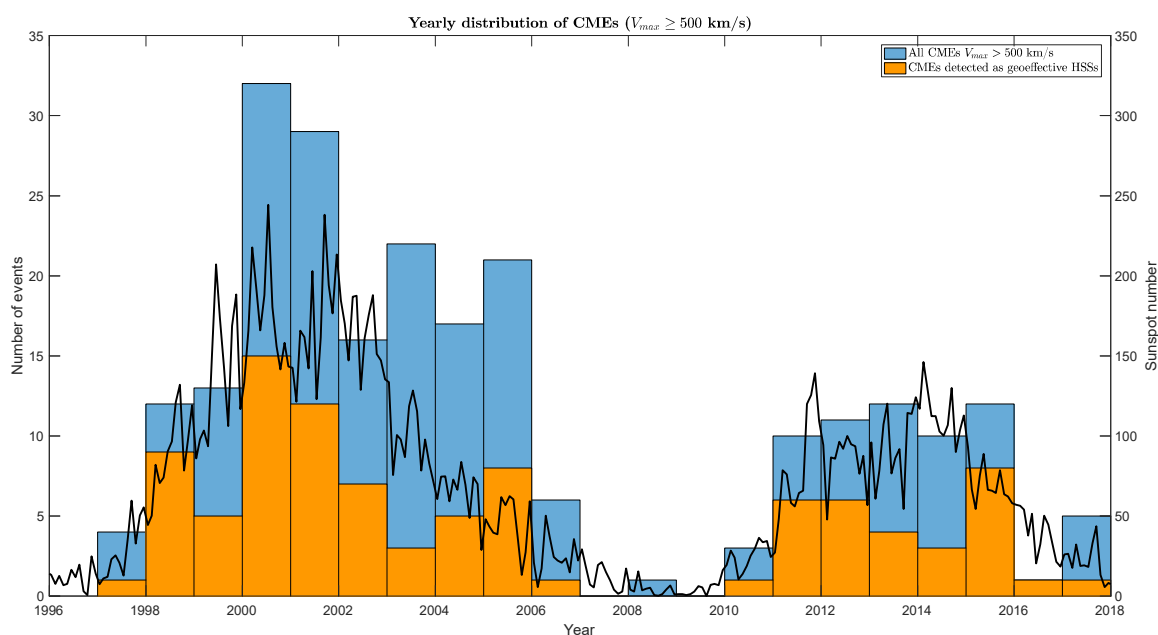
Kuva 14. Geo-HSS tapahtumien (ilman koronan massapurkausta) vuosittainen jakautuminen, jaoteltu maksiminopeuden mukaan.

Kuvien 13 ja 14 mukaan geo-HSS tapahtumia on esiintynyt eniten aurinkosyklin laskevassa vaiheessa, vuosina 1995 - 1996, 2003 - 2008 ja 2015 - 2017. Edellä mainittujen 11 vuoden aikana geo-HSS tapahtumia on ollut yhteensä 168, eli noin 15,3 tapahtumaa vuotta kohden.

Aurinkosyklin nousevassa vaiheessa ja maksimivuosina (vuodet 1997 - 2002 ja 2009 - 2014; kaikkiaan 12 vuotta) geo-HSS tapahtumia on ollut yhteensä 93, eli noin 7,8 tapahtumaa vuotta kohden.

Tutkittavan aikavälin vuonna 2003 geovaikuttavan aurinkotuulen virtauksen maksiminopeus on ollut kuvan 14 mukaan selvästi muita vuosia korkeampi. Geo-HSS tapahtumia, joille $V_{max} \geq 750 \text{ m/s}$, on ollut tuolloin yhteensä 7 tapahtumaa.

4.1.2 Geo-HSS tapahtumat koronan massapurkauksissa



Kuva 15. Koronan massapurkauksien (CME) vuosittainen jakautuminen (sininen). Listasta poistettujen geo-HSS tapahtumien vuosittainen jakautuminen (oranssi).

HSS-tapahtumien automaattinen etsintäohjelma poimii joskus aurinkotuulidatasta myös koronan massapurkaus ("Coronal mass ejection, CME") –tapahtumia. Nämä on poistettu käytämällä Richardson & Cane (2010) listaa koronan massapurkauksista (oranssit pylväät kuvassa 15).

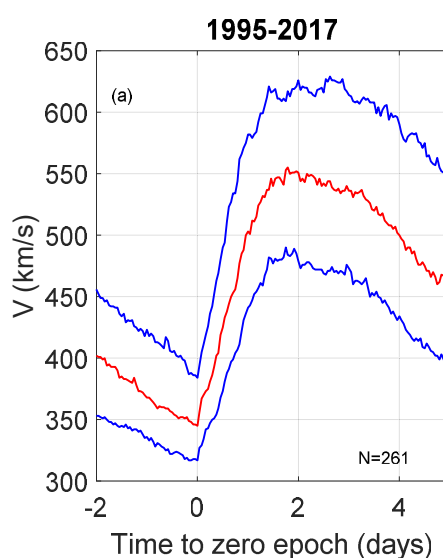
4.2 Ominaisuuksien keskimääräiset arvot tutkittavalla aikavälillä

Geo-HSS tapahtuman ominaisuuksien keskimääräisiä arvoja tutkitaan superepookkikuvien (kuvat 16 - 23) avulla. Kuvat on piirretty tutkimuksessa käytetyllä ohjelmalla superepookkimenetelmää käyttäen. Menetelmässä ohjelma erottelee OMNI-datasta kaikki geo-HSS tapahtumat ja piirtää haluttua tapahtuman ominaisuutta vastaavan mediaanikäyrän (punainen käyrä) ja ylä- ja alakvartiilin (siniset käyrät).

Superepookkikuvien pystyakselilla on geo-HSS tapahtuman ominaisuutta kuvaavan suureen arvo. Vaaka-akselilla on aika. Aikaa kuvaava lukuarvo (*days*) tarkoittaa vuorokausien määrää geo-HSS tapahtuman alkamishetkestä (nollaepookki; engl. "zero epoch"). Termi N kertoo geo-HSS tapahtumien lukumäärän aikavälillä 1995 – 2017. Termi I_{med} kertoo mediaanikäyrän integraalin aikavälillä välillä 0 – 5 *days*.

4.2.1 Nopeus

Kuvassa 16 nopeuden v mediaani saa arvoja välillä 350 – 550 *km/s*. Kahden päivän aikana ennen nollaepookkia v laskee noin 50 *km/s*. Geo-HSS tapahtuman alussa v on minimiarvossaan.

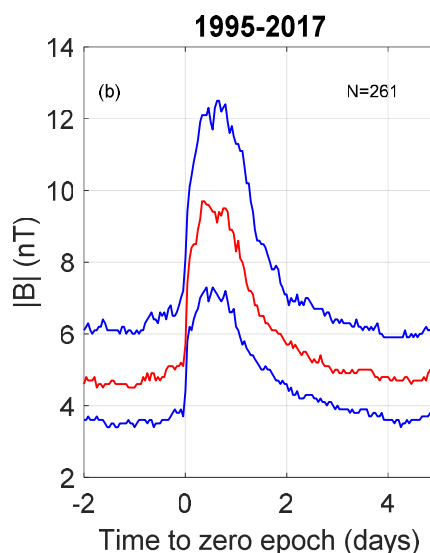


Kuva 16. Aurinkotuulen nopeus. Punainen käytä on mediaani ja siniset käyrät ala- ja yläkvartiili.

Geo-HSS tapahtuman kahden ensimmäisen vuorokauden aikana v kasvaa lähes tasaisesti noin 150 km/s . Toisen vuorokauden aikana v kasvaa noin 50 km/s . Kahden vuorokauden kuluttua nollaepookista v on saavuttanut maksimiarvonsa. Geo-HSS tapahtuman kolmannen vuorokauden ajan v pysyttelee lähellä maksimiarvoa. Neljännen ja viidennen vuorokauden aikana v laskee tasaisesti maksimi- ja minimiarvon keskiluvulle.

4.2.2 Magneettivuon tiheys

Kuvassa 17 magneettivuon tiheyden itseisarvon B mediaani saa arvoja välillä $4,5 - 9,5 \text{ nT}$. Kahden päivän aikana ennen nollaepookkia B pysyy lähellä minimiarvoaan. Noin vuorokausi ennen nollaepookkia B nousee noin $0,5 \text{ nT}$.

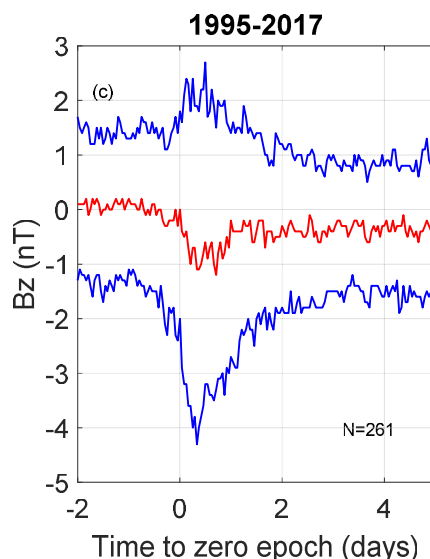


Kuva 17. Magneettivuon tiheyden itseisarvo, sama formaatti kuin kuvassa 16.

Nollaepookissa B kasvaa hyppäyksenomaisesti noin 3 nT ja jatkaa tämän jälkeen kasvamista. Noin puolen vuorokauden kuluttua nollaepookista B saavuttaa maksimiarvonsa. B pysyttelee maksimiarvossaan geo-HSS tapahtuman ensimmäisen vuorokauden loppuun saakka. Geo-HSS tapahtuman toisen vuorokauden aikana B laskee noin 1 nT :n päähän minimiarvosta. Kolmannen ja neljännen vuorokauden aikana lasku jatkuu hitaampana ja neljän vuorokauden kuluttua B saavuttaa jälleen minimiarvonsa.

4.2.3 Magneettivuon tiheyden z-komponentti

Kuvassa 18 magneettivuon z akselin suuntaisen komponentin B_z mediaani saa arvoja välillä $-1 - 0,1 \text{ nT}$. Kahden päivän aikana ennen nollaepookkia B_z pysyy lähellä nollaa. Noin vuorokausi ennen nollaepookkia B_z :n mediaani laskee noin $0,5 \text{ nT}$.

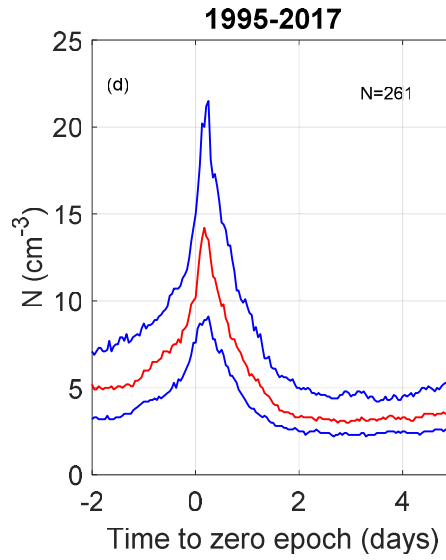


Kuva 18. Magneettivuon tiheyden z-komponentti, sama formaatti kuin kuvassa 16.

Nollaepookissa B_z :n mediaani jatkaa laskemista ja noin puolen vuorokauden kuluttua nollaepookista B_z :n mediaani saavuttaa minimiarvonsa (B_z :n mediaanin minimiarvossa magneettikenttä on z akselin suunnassa voimakkaimmillaan; miinus merkki kertoo vain suunnan). B_z :n mediaani pysyttelee minimiarvossaan geo-HSS tapahtuman ensimmäisen vuorokauden loppuun saakka. Geo-HSS tapahtuman toisen vuorokauden aikana B_z :n mediaani kasvaa noin $0,5 \text{ nT}$:n verran ja pysyttelee geo-HSS tapahtuman loppuun saakka maksimi- ja minimiarvon keskiluvulla.

4.2.4 Elektronitiheys

Kuvassa 19 elektronitiheyden N mediaani saa arvoja välillä $3 - 14 \text{ cm}^{-3}$. Kahden vuorokauden aikana ennen nollaepookkia N kasvaa tasaisella kiihtyvyydellä noin 8 cm^{-3} . Nollaepookissa kasvu jatkuu ja N saavuttaa maksiminsa muutama tunti nollaepookin jälkeen.

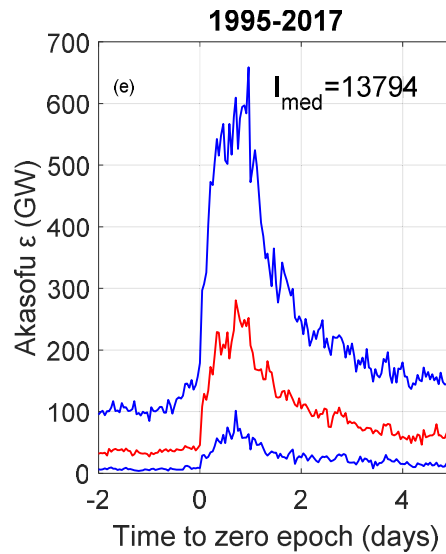


Kuva 19. Elektronitiheys, sama formaatti kuin kuvassa 16.

Maksimin saavutettuaan N laskee tasaisella kiihtyvyydellä minimiarvoonsa. N pysyttelee minimiarvossaan geo-HSS tapahtuman loppuun saakka.

4.2.5 Akasofun epsilon-parametri

Kuvassa 20 Akasofun epsilon-parametrin ε mediaani saa arvoja välillä 20 – 280 GW. Kahden vuorokauden aikana ennen nollaepookkia ε pysyttelee lähellä minimiarvoaan.

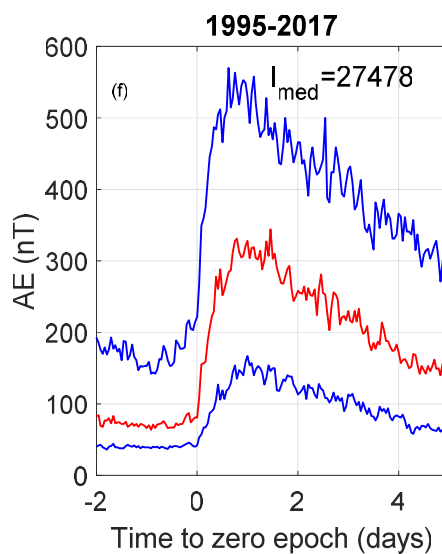


Kuva 20. Akasofun epsilon-parametri, sama formaatti kuin kuvassa 16.

Nollaepookissa ε kasvaa lähes hyppäyksenomaisesti noin maksimi- ja minimiarvon puoleenväliin. Tämän jälkeen kasvu jatkuu, kunnes ε saavuttaa maksiminsa noin yhden vuorokauden kuluttua nollaepookista.

4.2.6 AE-indeksi

kuvassa 21 AE -indeksin mediaani saa arvoja välillä 80 – 330 nT . Kahden vuorokauden aikana ennen nollaepookkia AE pysyttelee lähellä minimiarvoaan.

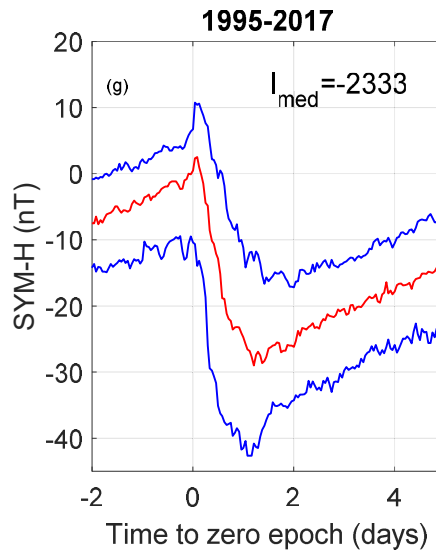


Kuva 21. AE -indeksi, sama formaatti kuin kuvassa 16.

Nollaepookissa AE kasvaa ε :n tavoin lähes hyppäyksenomaisesti noin maksimi- ja minimiarvon puoleenväliin. Tämän jälkeen kasvu jatkuu, kunnes AE saavuttaa maksimiavonsa noin yhden vuorokauden kuluttua nollaepookista. Geo-HSS tapahtuman toisesta vuorokaudesta alkaen AE laskee tasaisesti. Neljännen vuorokauden kuluttua nollaepookista AE on noin puolessa välissä maksimi- ja minimiarvoaan.

4.2.7 SYM-H-indeksi

Kuvassa 22 $SYM - H$ -indeksin mediaani saa arvoja välillä $-28 - 1 \text{ nT}$. Kahden vuorokauden aikana ennen nollaepookkia $SYM - H$ kasvaa tasaisesti maksimiarvoonsa.



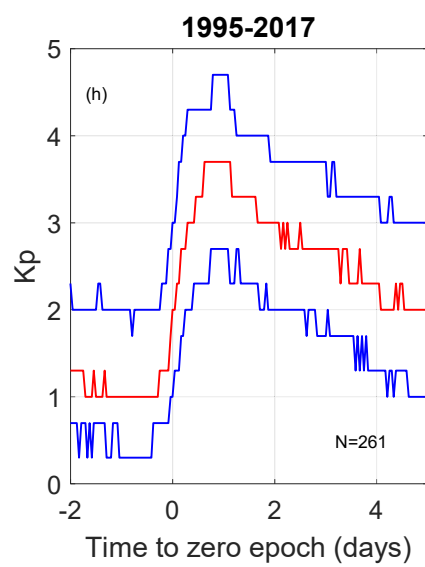
Kuva 22. SYM-H-indeksi, sama formaatti kuin kuvassa 16.

Geo-HSS tapahtuman ensimmäisen vuorokauden aikana $SYM - H$ laskee tasaisesti minimiarvoonsa. Geo-HSS tapahtuman toisesta vuorokaudesta lähtien $SYM - H$ kasvaa tasaisesti. Viidennen vuorokauden kuluttua nollaepookista $SYM - H$ on noin puolessa välissä maksimi- ja minimiarvoaan.

4.2.8 K_p -indeksi

Kuvassa 23 K_p -indeksin mediaani saa arvoja välillä $1,0 - 3,8$. Kahden vuorokauden aikana ennen nollaepookkia K_p pysyttelee lähellä minimiarvoaan.

Geo-HSS tapahtuman ensimmäisen vuorokauden aikana K_p kasvaa tasaisesti maksimiarvoonsa. Geo-HSS tapahtuman toisesta vuorokaudesta lähtien K_p laskee tasaisesti. Neljännen vuorokauden kuluttua nollaepookista K_p on noin puolessa välissä maksimi- ja minimiarvoaan.



Kuva 23. K_p -indeksi, sama formaatti kuin kuvassa 16.

4.3 Ominaisuudet kahdessa eri geo-HSS tapahtumassa

Kappaleissa 4.3.1 ja 4.3.2 analysoidaan kahden toisistaan poikkeavan geo-HSS tapahtuman ominaisuuksia aikasarjakuvien (kuvat 24 ja 25) avulla.

Aikasarjakuvissa on kuvattuna geo-HSS tapahtuman ominaisuuksien (a – h) hetkelliset arvot kuuden vuorokauden pituisella aikavälillä. Ominaisuuksien arvot näkyvät kuvissa sinisellä käyrällä kuvitettuna.

Paneelissa (a) punainen katkoviiva viittaa HSS-tapahtuman ehtoon 2 (ks. 2.6.2). Paneelissa (h) punainen katkoviiva viittaa tutkimuksen kriteeriin geovaikuttavalle aurinkotuulelle (ks. 2.6.1).

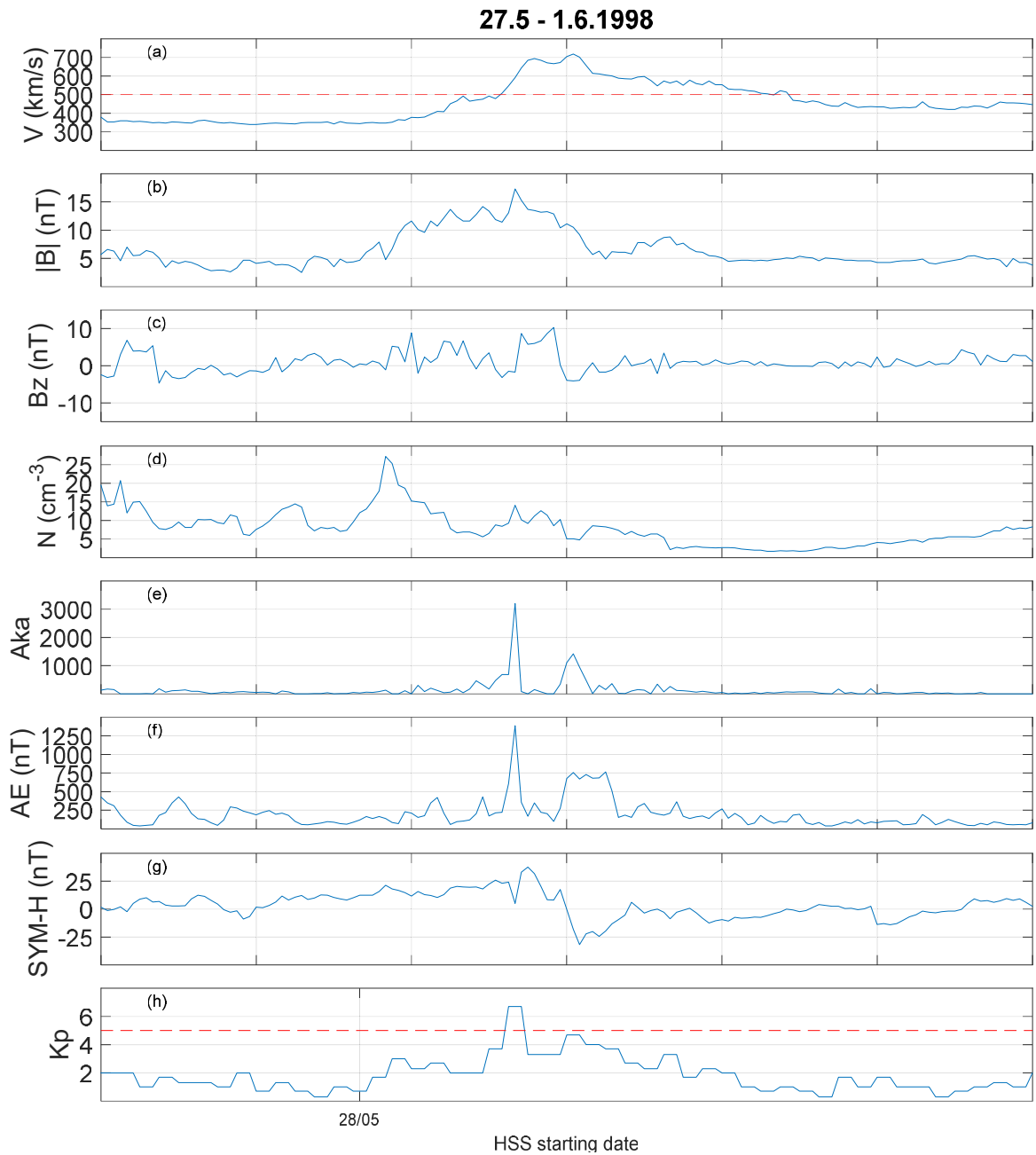
4.3.1 28.5.1998 alkanut geo-HSS tapahtuma

Kuvan 24 geo-HSS tapahtumassa aurinkotuulen parametrien (a, b ja d) maksimi-arvot ovat olleet selvästi ko. ominaisuuksia vastaavia yläkvartiileja (ks. kuvat 16, 17 ja 19) suuremmat.

Noin vuorokausi nollaepookin jälkeen geomagneettisten indeksien (f ja g) sekä Akasofun epsilon-parametrin (e) kuvaajissa on havaittavissa selvä piikki. Tätä piikkiä edeltää muutamman tunnin aikajakso, jolloin magneettivuon tiheyden B_z komponentin arvo on negatiivinen. Tällöin B_z osoittaa etelään ja mahdollistaa aurinkotuulen magneettikentän kytkeytymisen magnetosfääriin kanssa. B_z kääntyy piikin kohdalla pohjoiseen, jolloin kytkeytyminen katkeaa ja geomagneettinen vaikutusaika jää lyhyeksi (vrt. 4.3.2).

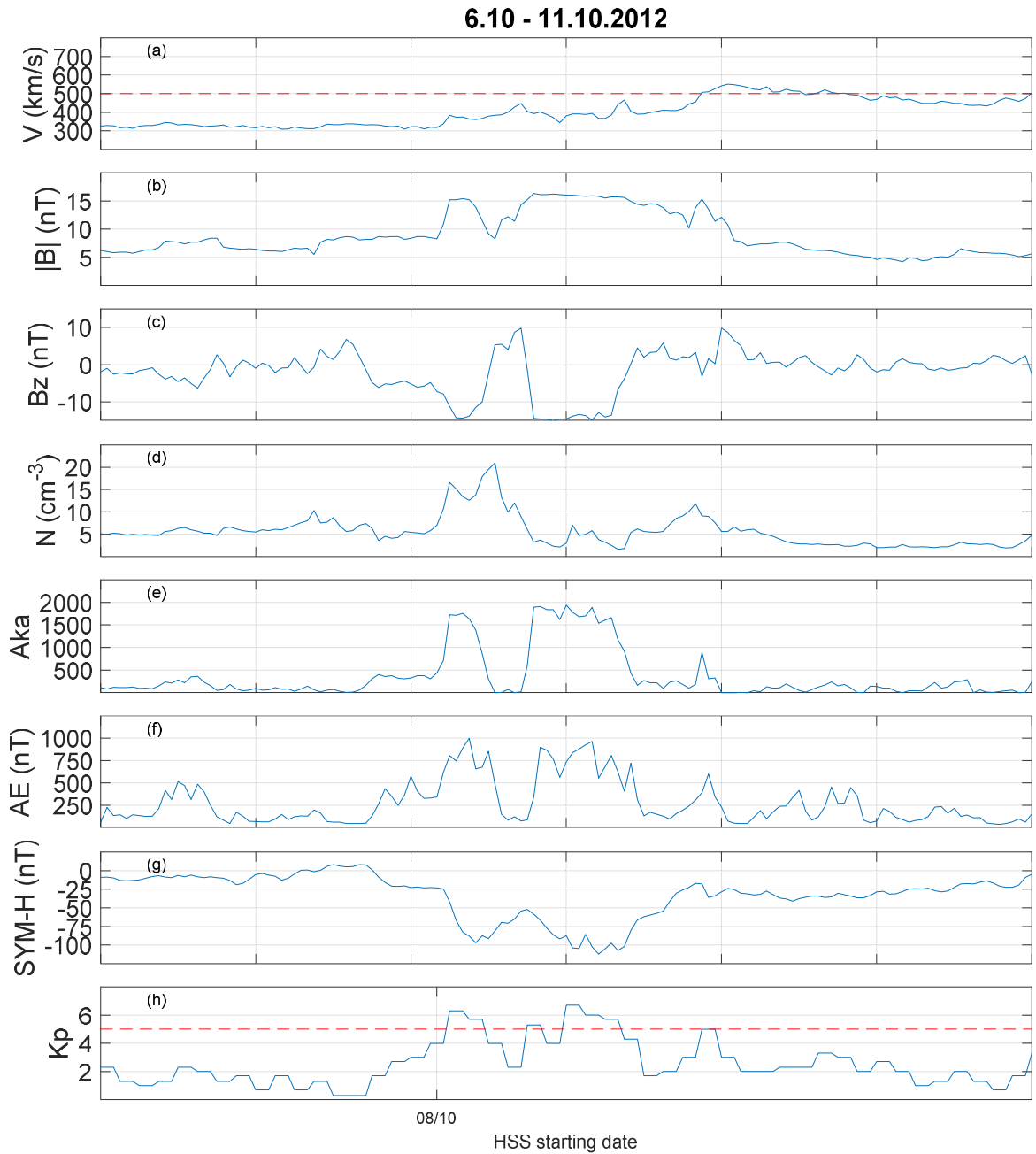
Noin puolitoista vuorokautta nollaepookin jälkeen B_z kääntyy uudelleen etelään. Tämä näkyy edelleen geomagneettisten indeksien sekä Akasofun epsilon-parametrin arvojen kasvuna. Tällöin magneettivuon tiheyden arvo on jo laskenut huomattavasti, joten vaikutus on edelliseen verrattuna pienempi.

Aurinkotuulen parametrien suurista maksimi-arvoista huolimatta, IMF:n tuoma energia ei päässyt purkautumaan ko. tapahtumassa kovinkaan voimakkaasti magnetosfääriin (vrt. 4.3.2), koska B_z komponentti osoitti suurimman osan ajasta pohjoiseen.



Kuva 24. Aikasarjakuva 28.5.1998 alkaneesta geo-HSS tapahtumasta. Kuvan alkuaika on 27.5. 00UT ja loppuaika 1.6. 24UT. Parametrit ovat (a) aurinkotuulen nopeus, (b) magneettivuon tiheys, (c) magneettivuon tiheyden z-komponentti, (d) elektronitiheys, (e) Akasofun epsilon-parametri, (f) AE-indeksi, (g) SYM-H-indeksi, (h) K_p -indeksi. Alimpaan paneeliin on merkitty näkyviin nollaepookin ajankohta 28.5.1998 16UT.

4.3.2 8.10.2012 alkanut geo-HSS tapahtuma



Kuva 25. Aikasarjakuva 8.10.2012 alkaneesta geo-HSS tapahtumasta. Kuvan alkuaika on 16.19.00UT ja loppuaika 11.10.24UT. Kuvan formaatti on sama kuin kuvassa 24. Alimpaan paneeliin on merkitty näkyviin nollaepookin ajankohta 8.10.2012 4UT.

Kuvan 25 geo-HSS tapahtumassa aurinkotuulen parametreista nopeus ja elektronitiheys (a ja d) mukailevat ko. ominaisuuksia vastaavia mediaaniarvoja (ks. kuvat 16 ja 19). Magneettivuon tiheys on sen sijaan selvästi ko. ominaisuutta vastaavaa yläkvartiilia (ks. kuva 17) suurempi.

Lähes välittömästi nollaepookin jälkeen geomagneettisten indeksien (f ja g) sekä Akasofun epsilon-parametrin (e) kuvaajissa on havaittavissa selvää muutosta. Noin puolen vuorokauden kuluttua ko. kuvaajissa muutostila näyttää palautuvan hetkellisesti (noin viiden tunnin ajaksi) normaaliksi. Vajaa vuorokausi nollaepookista tapahtuu jälleen ko. kuvaajien mukaan voimakas häiriö, joka näyttää kestävän noin kymmenen tunnin ajan.

Muutostilat ko. kuvaajissa korreloivat edelleen selvästi magneettivuon tiheyden B_z komponentin (c) arvon muutoksen kanssa. Nyt kuvaajan c mukaan IMF:n B_z komponentti on iso ja pitemmän ajan etelään päin suuntautunut. Tämä saa aikaan tehokkaan kytkeytymisen IMF:n ja magnetosfäärin välille, joten aurinkotuulen energiaa purkautuu paljon magnetosfääriin (vrt. 4.3.1). Tällöin havaitaan voimakas rengasvirta (SYM-H jopa -100 nT) ja suuria AE-indeksin arvoja.

5 YHTEENVETO

Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeat virtaukset ovat peräisin Auringosta virtaavasta hiukkaspopulaatiosta (elektronit, protonit ja mm. heliumytimet), joka magnetosfäärin kohdastaan saa aikaan noin 4 – 6 vuorokautta kestävä geovaikuttavan HSS tapahtuman.

Seuraavat huomiot on tehty tutkimustulosten geo-HSS tapahtuman ominaisuuksien keskimääräisiä arvoja käsittelevän kappaleen 4.2 perusteella.

Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten ominaisuuksien keskimääräiset maksimiarvot (mediaani ja kvartiiliväli):

- Maksiminopeus $(550 \pm 70) \text{ km/s}$
- Magneettivuon tiheyden maksimi $(9,5 \pm 2,0) \text{ nT}$
- Elektronitiheyden maksimi $(14 \pm 6) \text{ cm}^{-3}$

Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten ominaisuuksien kehittyminen keskimääräisessä geo-HSS tapahtumassa:

- Nopeus on nollaepookissa minimissään. 2 vrk:n kuluttua nopeus on saavuttanut maksimiarvonsa. 3. vrk:n ajan Nopeus pysyy lähellä maksimia. 4. vrk:sta lähtien nopeus alkaa laskea n. 40 yksikköä vrk:ssa.
- Magneettivuon tiheys kasvaa nopeasti heti nollaepookissa ja saavuttaa maksimiarvonsa noin puolen vuorokauden kuluttua CIR-alueessa. 2. vrk:n ensimmäisen puoliskon aikana magneettivuon tiheys laskee minimin ja maksimin puoleen väliin. 3. ja 4. vrk:n aikana magneettivuon tiheys laskee tasaisesti minimiin.
- Magneettivuon tiheyden z-komponentti on kääntynyt etelään noin puoli vuorokautta ennen nollaepookkia ja osoittaa tapahtuman 1 vrk:n ajan voimakkaasti etelään.
- Elektronitiheys alkaa kasvaa 2 vrk ennen nollaepookkia ja saavuttaa maksimiarvonsa muutaman tunnin kuluttua nollaepookista CIR-alueessa. 2 vrk:n kuluttua nollaepookista elektronitiheys on laskenut minimiarvoonsa.

Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten geovaikuttavuutta määrittävät indeksit ja Akasofun epsilon-parametri keskimääräisessä geo-HSS tapahtumassa:

- Akasofun epsilon-parametri kasvaa moninkertaiseksi heti nollaepookin jälkeen (keskimääräinen maksimiarvo $\sim 300\text{ GW}$, noin vuorokausi nollaepookista).
- AE-indeksi kasvaa moninkertaiseksi muutaman tunnin kuluessa nollaepookista (keskimääräinen maksimiarvo $\sim 350\text{ nT}$, noin vuorokausi nollaepookista).
- SYM-H-indeksi laskee jyrkästi nollaepookin jälkeen saavuttaen minimiarvonsa $\sim -30\text{ nT}$, noin vuorokausi nollaepookin jälkeen.
- Kp-indeksi on maksimissaan noin vuorokausi nollaepookin jälkeen.

Tutkimustulosten geo-HSS tapahtumien vuosittaista jakautumista käsittelevän kappaleen 4.1 mukaan geovaikuttavan aurinkotuulen nopeita virtauksia sisältäviä hiukkaspopulaatioita törmäsi aikavälillä 1995 - 2017 Maata ympäröivään magnetosfääriin yhteensä 356.

Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeiden virtausten jakautuminen aurinkosyklin eri vaiheille:

- Geovaikuttavan aurinkotuulen nopeat virtaukset jakautuivat kaikille aurinkosyklin eri vaiheille (ks. kuvat 13 ja 14). Aurinkosyklin laskevassa vaiheessa esiintymistodennäköisyys oli lähes kaksinkertainen muihin vaiheisiin verrattuna.
- Koronan massapurkauksien esiintymistodennäköisyys oli suurimmillaan aurinkosyklin maksimivuosina (ks. kuva 15)

Tutkimustuloksista kahden eri geo-HSS tapahtuman ominaisuuksia käsittelevästä kappaleesta 4.3 nähdään aurinkotuulen parametrien, geomagneettisten indeksien sekä Akasofun epsilon-parametrin välinen yhteys geomagneettisessa häiriötilassa.

Geomagneettisessa häiriötilassa geomagneettiset indeksit ja Akasofun epsilon-parametri reagoivat keskenään lähes samanaikaisesti aurinkotuulen parametrien hetkellisiin muutoksiin. Kun geovaikuttavan aurinkotuulen nopean virtauksen nopeus ja magneettivuon tiheys ovat *riittävän suuret* (ks. 2.6.2), geomagneettinen häiriötila on mahdollinen. Kun tämä mahdollisuus on olemassa ja IMF on suuntautuneena etelään (ilmenee magneettivuon tiheyden z-komponentin negatiivisena arvona), energiaa pääsee purkautumaan magnetosfääriin ja syntyy geomagneettinen häiriötila.

Lähteet

Aikio, A. (2010), *Ionosfäarifysiikka*, luentomoniste, Fysiikan laitos, Oulun yliopisto.

Aikio, A. (2011), *Revontulifysiikka*, luentomoniste, Fysiikan laitos, Oulun yliopisto.

Baumjohann, W., and R. Treumann, *Basic Space Plasma Physics*, Imperial College Press, Imperial College, London, (1996).

Borovsky, J. E., and M. H. Denton (2010), Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU, *J. Geophys. Res.*, 115, A10101, doi: 10.1029/2009JA014966.

Cairns, Iver (1999), Co-rotating Interaction Regions: interactions between fast and slow streams. (Luettu 17.8.2017). <<http://www.physics.usyd.edu.au/~cairns/teaching/lecture11/node4.html>>.

Davis, T. N., and M. Sugiura (1966), Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, *J. Geophys. Res.*, 71(3), 785–801, doi: 10.1029/JZ071i003p00785.

Grandin, M., A. T. Aikio, A. Kozlovsky, T. Ulich, and T. Raita (2015), Effects of solar wind high-speed streams on the high-latitude ionosphere: Superposed epoch study, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 10,669–10,687, doi: 10.1002/2015JA021785.

Hargreaves, J., M. Birch, and B. Bromage (2007), D-and E-region effects in the auroral zone during moderately active 24-h period in July 2005, *Ann. Geophys.*, 25, 1837–1849, doi: 10.5194/angeo-25-1837-2007.

Kaila, K. (1998), *Revontulet*, Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.

Karttunen, H., K. J. Donner, P. Kröger, H. Oja, and M. Poutanen (2016) *Tähtitieteen perusteet*, Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, Helsinki.

Koskinen, H. (2001), *Johdatus plasmafysiikkaan ja sen avaruussovellutuksiin*, Limes.

Laitinen, T. (2007) *Rekonnektio maan magnetosfäärissä*, väitöskirja, Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto.

Matzka, J. and C. Stolle, Iver, Indices of Global Geomagnetic Activity. (Luettu 9.7.2018)
<<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>>.

NOAA Space weather scales for geomagnetic storms <<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>>

Richardson, I. G., and H. V. Cane (2010), Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties, *Solar Physics*, 264, 189–237, doi:10.1007/s11207-010-9568-6.

Smith, E. J. and Wolfe, J. H. (1976), Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneers 10 and 11. *Geophys. Res. Lett.*, 3: 137-140. doi:10.1029/GL003i003p00137

Zhang, J., et al. (2007), Understanding storm-time ring current development through data-model comparisons of a moderate storm, *J. Geophys. Res.*, 112, A04208, doi: 10.1029/2006JA011846.

Liitteet

A NOAA:n antama geomagneettisen häiriötilan luokittelu



NOAA Space Weather Scales



Category		Effect		Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Description	Duration of event will influence severity of effects			
Geomagnetic Storms					
G 5	Extreme	<p><u>Power systems:</u> widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage.</p> <p><u>Spacecraft operations:</u> may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites.</p> <p><u>Other systems:</u> pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=9	4 per cycle (4 days per cycle)	
G 4	Severe	<p><u>Power systems:</u> possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid.</p> <p><u>Spacecraft operations:</u> may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems.</p> <p><u>Other systems:</u> induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=8	100 per cycle (60 days per cycle)	
G 3	Strong	<p><u>Power systems:</u> voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices.</p> <p><u>Spacecraft operations:</u> surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems.</p> <p><u>Other systems:</u> intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=7	200 per cycle (130 days per cycle)	
G 2	Moderate	<p><u>Power systems:</u> high-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage.</p> <p><u>Spacecraft operations:</u> corrective actions to orientation may be required by ground control, possible changes in drag affect orbit predictions.</p> <p><u>Other systems:</u> HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=6	600 per cycle (360 days per cycle)	
G 1	Minor	<p><u>Power systems:</u> weak power grid fluctuations can occur.</p> <p><u>Spacecraft operations:</u> minor impact on satellite operations possible.</p> <p><u>Other systems:</u> migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine).**</p>	Kp=5	1700 per cycle (900 days per cycle)	

* Based on this measure, but other physical measures are also considered.
 ** For specific locations around the globe, use geomagnetic latitude to determine likely sightings (see www.swp.noaa.gov/Aurora)